

**А.Б.БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, В.А.ЖОВДАК**, докт.техн.наук, НТУ «ХПИ»;  
**О.В.ЧЕРНЫХ**, ГП «Харьковский метрополитен»;  
**Ю.А.ЯРОШОК**, канд.техн.наук, УкрГАЗТ

## СЛУЧАЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ РАМ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С УЧЕТОМ НЕРОВНОСТИ ПУТИ

Розглядається задача визначення стохастичних характеристик рам візків вагонів метрополітену при випадковому впливі, викликаному нерівностями шляху. Зовнішній вплив моделюється стаціонарним випадковим процесом. Розрахунок виконано методом кінцевих елементів і методом спектральних представлень, використовувався програмний комплекс COSMOS/M. У роботі досліджувався напружено-деформований стан системи при різних моделях навантаження.

The problem of definition of probability performances of the bogie frames of transit vehicles at random action is considered. The random action is caused by track irregularities. The external load is modelled by the stationary random process. The calculation is executed by the finite element method and the method of spectral representations. The program system COSMOS/M was used. The mode deformation of the system was investigated at the different models of the loading.

### Постановка задачи

В работе исследуется напряженно-деформированное состояние рамы тележки вагона метрополитена ЕЖ-3 при случайном воздействии, вызванном неровностями пути. Совместные колебания объединенной системы «вагон-путь» вызываются рядом разнообразных по природе и характеру возмущающих факторов: непостоянством по длине пути его инерционных, упругих и диссипативных свойств, наличием люфтов, просадок, стыков, неравномерного износа рельсов, ползунов, дисбаланса и других несовершенств колес, воздействием воздушной среды и т. д. Большинство из этих факторов носит случайный характер, поэтому делались многочисленные попытки описания экспериментальных данных о возмущениях с помощью аналитических выражений [1, 2, 3]. Так, во многих случаях для аппроксимации корреляционных функций случайных возмущений применяют выражения типа:

$$K(\tau) = D \sum_{i=1}^m e^{-\alpha_i |\tau|} (a_i \cos \omega_i \tau + b_i \sin \omega_i |\tau|), \quad (1)$$

где  $D$  – дисперсия возмущения. Выражение для спектральной плотности возмущения с корреляционной функцией (1) имеет вид

$$S(\omega) = \frac{D}{2\pi} \sum_{i=1}^m \alpha_i [a_i (\mu_{1i} + \mu_{2i}) + b_i (\mu_{1i} - \mu_{2i})], \quad (2)$$

$$\text{где } \mu_{1i} = \frac{1}{\alpha_i^2 + (\omega + \omega_i)^2}, \mu_{2i} = \frac{1}{\alpha_i^2 + (\omega - \omega_i)^2}.$$

Другой способ описания статистических характеристик основан на пред-

положении о том, что возмущения, действующие на вагон, состоят из ряда некоррелированных между собой составляющих. При этом выражения для спектральной плотности записываются в виде

$$S(\omega) = \sum_{r=1}^m S_r(\omega), \quad (3)$$

где  $S_r(\omega)$  – спектральная плотность  $r$ -ой составляющей возмущения,  $m$  – число составляющих.

Для спектральных плотностей наиболее существенных составляющих из (3) при исследовании случайных колебаний вагонов метрополитена в работе используются следующие выражения [3].

Широкополосные случайные неровности, которые моделировались процессом типа белый шум по ускорению.

Неровности пути, для которых спектральная плотность  $S_{\eta}(\omega) = 2,55\omega^2 / (\omega^4 - 98\omega^2 + 4400)$ , где  $\omega$  – частота (Гц). Эта функция аппроксимирует результаты статистической обработки во ВНИИВ ускорений буксовых узлов опытного образца вагона [3].

Представленные аналитические выражения для спектральных плотностей возмущений при движении вагонов по железнодорожному пути используются в работе для исследования случайных колебаний.

Уравнение вынужденных колебаний конечно-элементной модели конструкции рамы тележки вагона метрополитена при случайном воздействии, вызванном неровностями пути, записывается в виде:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = -(MA + M_1)\ddot{\eta}, \quad (4)$$

где  $M$ ,  $C$ ,  $K$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости конечно-элементной модели (КЭМ) конструкции,  $A$  – матрица псевдостатических коэффициентов влияния, определяемая соотношением  $A = -K^{-1}K_1$ ,  $M_1$  и  $K_1$  – подматрицы, позволяющие выразить усилия, действующие на систему, через известные ускорения и перемещения кинематически возбуждаемых отметок конструкции,  $q$  – вектор обобщенных перемещений КЭМ.

Решение уравнения (4) представим в виде ряда по формам собственных колебаний:

$$q = \sum_{i=1}^n y_i \phi_i, \quad (5)$$

где  $n$  – число степеней свободы системы,  $\phi_i$  – вектор  $i$ -й собственной формы колебаний,  $y_i$  – коэффициент разложения в ряд, зависящий от времени.

При подстановке выражения (5) в (4) получаем систему независимых дифференциальных уравнений:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \dot{y}_i + p_i^2 y_i = F_i, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

где  $n$  – число степеней свободы системы,  $p_i$  –  $i$ -я собственная частота,  $\xi_i$  – модальный коэффициент затухания,  $F_i$  – модальная нагрузка, которая опреде-

ляется по формуле:

$$F_i = G_i^T \ddot{\eta}, \quad (7)$$

где  $G_i = -(MA + M_1)^T \phi_i$ .

Конструкция рамы тележки вагона была разбита на оболочечные 4-х узловых конечные элементы (тонкие пластины и оболочки).

Аппроксимирующий полином для узловых перемещений оболочечного конечного элемента имеет следующий вид:

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 + a_{11}x^3y + a_{12}y^3x, \quad (8)$$

где  $\overline{a_{1, a_{12}}}$  – константы полинома, которые определяются с помощью узловых значений функций перемещений.

Конструкция рамы с разбивкой на конечные элементы представлена на рис. 1: позицией 1 показана пружина буксового подвешивания (8 шт.), 2 – пружина центрального подвешивания с массой кузова вагона, 3 – центральная балка, 4 – тяговый электродвигатель.

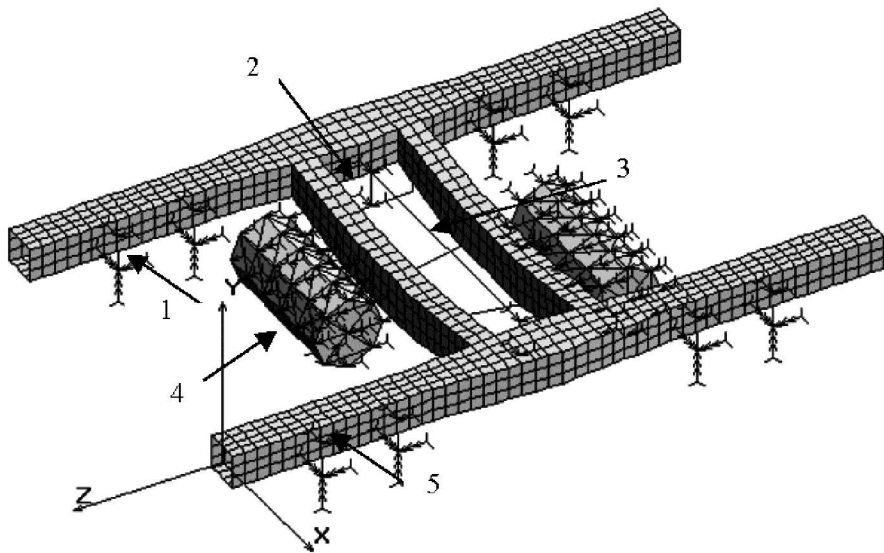


Рис. 1.

### Исследование собственных колебаний

Решение задачи нахождения собственных частот и форм колебаний конструкции сводится к решению частотного уравнения и уравнения форм соответственно [1,2]:

$$\det(K - p^2 M) = 0; \quad (9)$$

$$(K - p^2 M)q_0 = 0, \quad (10)$$

где  $p$  – вектор, содержащий собственные частоты конструкции.

Значения собственных частот рамы тележки вагона метрополитена представлены в табл. 1. Первые четыре собственные формы колебаний рамы тележки вагона показаны на рис. 2.

Таблица 1. Собственные частоты рамы тележки

№ частоты	Значение частоты, Гц	№ частоты	Значение частоты, Гц
1	1,48	6	10,53
2	1,66	7	12,24
3	5,52	8	17,95
4	7,51	9	50,89
5	9,45	10	69,55

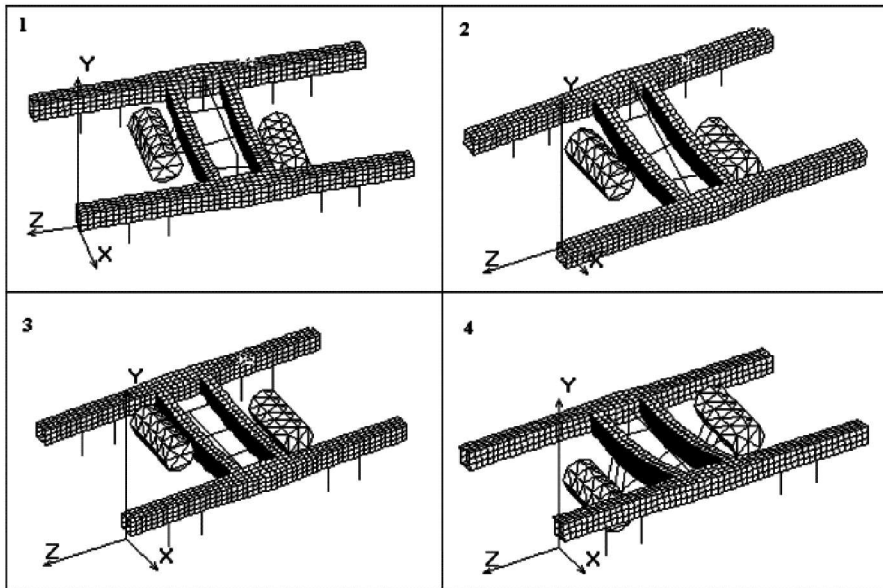


Рис. 2.

Как видно из табл. 1 и рис. 2, первая собственная частота соответствует подпрыгиванию кузова вагона, вторая – боковой качке вагона, третья – подпрыгиванию рамы тележки вагона, четвертая – боковой качке рамы с перемещениями тяговых электродвигателей. Значения собственных частот рамы тележки вагона метрополитена согласуются с экспериментальными данными, полученными для рам вагонов данного типа.

## Исследование случайных колебаний

Задача случайных колебаний решается методом спектральных представлений, с помощью которого выражение для спектральной плотности выходных процессов  $q_i$  при возмущении  $\eta$  имеет вид [1, 2, 3]:

$$S_{q_i}(\omega) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{ij} \phi_{ik} G_j^2 H_j^*(\omega) H_k(\omega) S_{\eta}(\omega), \quad (i = \overline{1, n}) \quad (11)$$

где  $S_{\eta}(\omega)$  – спектральная плотность ускорения возмущения  $\eta$ ,  $H_j(\omega)$  – передаточная функция.

Практическую важность представляют дисперсии случайных величин, по которым в последующем возможно оценить прочность и устойчивость вагонных конструкций. Связь между дисперсией и спектральной плотностью выходных процессов имеет вид:

$$\sigma_{q_j}^2 = \int_0^{\infty} S_{q_j}(\omega) d\omega, \quad (12)$$

Воздействия подбирались таким образом, чтоб их дисперсии были равны:  $\sigma_{\eta}^2 = 0,12 \text{ м}^2$ . При расчете учитывались первые три собственные частоты рамы тележки. Коэффициент модального демпфирования равен  $\zeta = 0,1$ . Расчет случайных колебаний проводился без учета запаздывания воздействия на грузки на буксы тележки.

График спектральной плотности ускорения в направлении  $y$  для двух типов возмущений представлен на рис. 3. Кривые 1, 2 соответствуют спектральным плотностям ускорения возмущения первого и второго типов.

Максимальные дисперсии перемещений  $\sigma_{q_j}^2$  для двух типов воздействия наблюдались в узле КЭМ конструкции рамы тележки вагона, который соответствует кузову вагона (рис. 1, поз. 2). Значения дисперсий перемещений в этом узле представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальная дисперсия перемещения для первого типа возмущения (процесс типа белого шума) выше по сравнению с максимальной дисперсией перемещения для второго типа возмущения почти в 2 раза.

Графики спектральных плотностей перемещений для данных типов воздействия показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

Из рис. 4, 5 видно, что максимум спектральной плотности перемещения достигается на первой собственной частоте. Вторая собственная частота не вносит вклад в колебания конструкции, поскольку при второй собственной частоте происходит боковая качка вагона, а вклад третьей собственной частоты – 0,04 % (для первого типа воздействия) и 1,7 % (для второго).

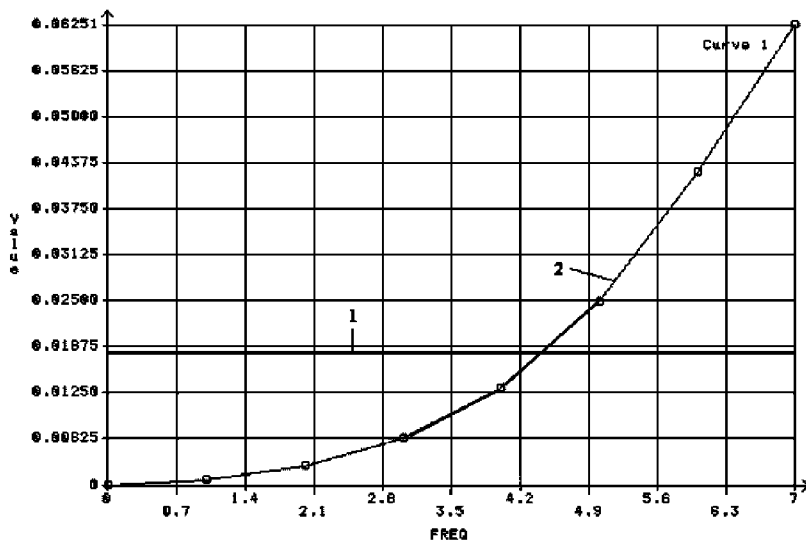


Рис. 3.

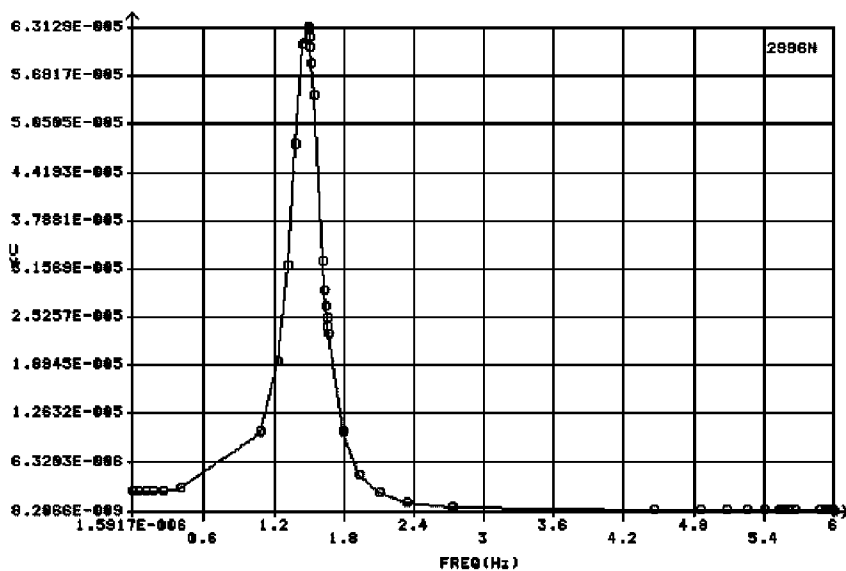


Рис. 4

Таблица 2. Максимальные дисперсии перемещений, м<sup>2</sup>

первый тип возмущения	второй тип возмущения
$3,04 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$

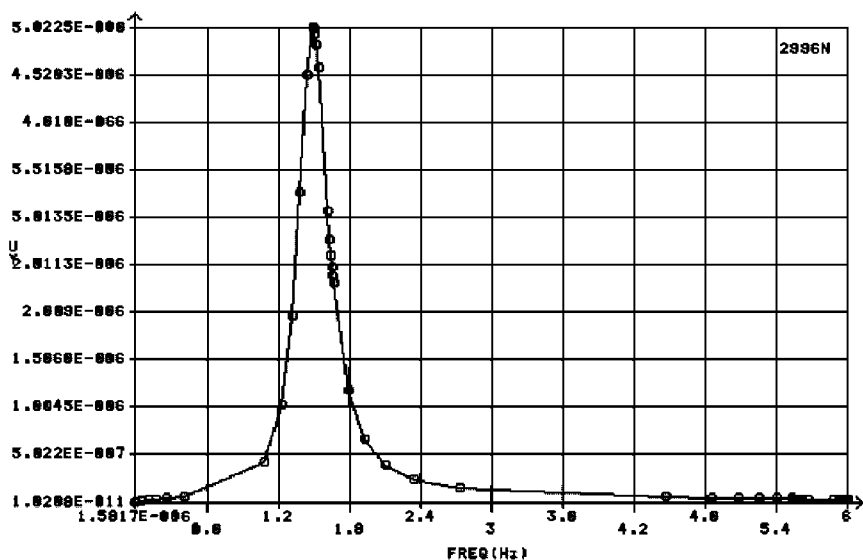


Рис. 5.

Проводился анализ напряженного состояния рамы тележки для двух типов нагружения. Как показывают результаты, максимальные дисперсии интенсивностей напряжений  $\sigma_{\sigma_i}^2$  находятся в узлах модели, соответствующих буксовому подвешиванию (рис. 1, поз. 5). Значения максимальных дисперсий интенсивностей напряжений представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, максимальная дисперсия интенсивности напряжений для первого типа возмущения (процесс типа белого шума) выше по сравнению с максимальной дисперсией интенсивности напряжений для второго типа возмущения почти в 2 раза.

Таблица 3. Максимальные дисперсии интенсивностей напряжений,  $\text{Па}^2$

первый тип возмущения	второй тип возмущения
$2,69 \cdot 10^{14}$	$2,36 \cdot 10^{13}$

Из полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее повреждаемой является модель внешнего воздействия – процесс типа белого шума. Различия в результатах, полученных с использованием двух моделей внешнего воздействия, объясняется тем, что значение спектральной плотности ускорения, приходящейся на первую собственную частоту рамы тележки вагона, для процесса типа белого шума в 13,6 раза выше по сравнению со спектральной плотностью ускорения для второго типа воздействия. Полученные численные результаты могут быть использованы для прогнозирования остаточного ресурса эксплуатируемых вагонов метрополитена с учетом усталостных отказов.

**Список литературы:** 1. *Макеев В.П., Гриненко Н.И., Павлюк Ю.С.* Статистические задачи динамики упругих конструкций. – М.: Наука, 1984. – 232 с. 2. *Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др.* – М.: Транспорт, 1992. – 440 с. 3. *Статистическая динамика рельсовых экипажей / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, С.Ф. Редько* – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.

*Поступила в редколлегию 18.11.2002*

УДК 621.891

**А.И.БЕРЕЗНЯКОВ**, канд. техн. наук; **Ю.А.ГРАДЫСКИЙ**, Хи ВВС  
**Н.Г.СТАДНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, Хи ВВС

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Досліджено вплив температури поверхні осадження і швидкості охолодження наплавляемого в процесі електромагнітного наплавлення матеріалу на втомну міцність і триботехнічні характеристики реставрованої поверхні. Отримано рівняння, що зв'язує виробництво ентропії зі швидкістю охолодження матеріалу. Експериментально встановлено, що термомагнітна обробка матеріалу приводить до поліпшення його структури. Виявлено, що відновлення деталей методом електромагнітного наплавлення приводить до поліпшення структури і триботехнічних властивостей поверхні.

The influence of precipitation surface's temperature and the speed of surfacing cooling in the process of material's electromagnetic building-up on the fatigue durability and tribomechanical characteristics of the restoration surface were examined. The equation connecting the production of entropy with the speed of material cooling was reached. It was established by the way of experiment that materials thermomagnetic machining leads to the improvement of its structure. It is discovered that details restoration by electromagnetic method leads to the improvement of the structure and tribomechanical properties of the surface.

**Введение.** Наиболее актуальной проблемой современного машиностроения является повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем применения технологических процессов, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических свойств изделий. К основным эксплуатационным характеристикам, от которых зависят надежность и долговечность, относятся износостойкость, прочность и циклическая долговечность.

Одним из методов повышения надежности и долговечности деталей является поверхностное упрочнение. Формирование упрочненного слоя, протекающие при этом физико-химические процессы, наличие несовершенств строения покрытия во многом определяют механические свойства изделия в целом. На сохранение физических и механических свойств композиции "упрочненный слой-основа" в процессе эксплуатации влияет, прежде всего,